

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-185-193

Оригинальная статья / Original Paper

**Новые виды мембранно-стержневых и мембранно-пневматических сооружений
и усовершенствованные методы их расчета**

А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования было создание новых быстровозводимых мембранно-стержневых сооружений и нелинейных методов их расчета. **Метод.** Применен шаговый метод с итерационной численной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности с применением на шаге метода конечных элементов **Результат.** Разработана методика статического расчета мембранно-стержневых сооружений с учетом нелинейных факторов. Составлен алгоритм расчета и по нему написана программа расчета таких сооружений. На данную программу получено свидетельство на ЭВМ № 2017613415 «Программа расчета мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов итерационным методом приращения параметров». **Вывод.** Рекомендовано применять одношаговый расчёт мембранно-стержневых систем с пятью итерациями на шаге, либо многошаговый расчёт с пятью шагами при одной итерации на шаге. Эффективны также смешанные варианты.

Ключевые слова: итерационный метод Эйлера-Коши третьего порядка точности, метод расчета мембранно-стержневых систем, новые конструктивные формы большепролетных мембранно-стержневых сооружений, эффективность новых объектов

Для цитирования: А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян. Новые виды мембранно-стержневых и мембранно-пневматических сооружений и усовершенствованные методы их расчета. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):185-193. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-185-193

**New types of membrane-rod and membrane-pneumatic structures
and improved methods for their calculation**

A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan

Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Politekhnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study was to create new pre-fabricated membrane-rod structures and non-linear methods for their calculation. **Method.** A stepwise method with an iterative numerical Euler-Cauchy procedure of the third order of accuracy was applied with the use of the finite element method at the step. **Result.** A technique for static calculation of membrane-rod structures has been developed, taking into account nonlinear factors. A calculation algorithm has been compiled and a program for calculating such structures has been written according to it. For this program, a certificate was obtained on the computer No. 2017613415 "Program for calculating membrane-pneumatic structures, taking into account non-linear factors by the iterative method of incrementing parameters." **Conclusion.** It is recommended to use a one-step calculation of membrane-rod systems with five iterations per step or a multi-step calculation with five steps with one iteration per step. Mixed options are also effective.

Keywords: iterative Euler-Cauchy method of the third order of accuracy, method for calculating membrane-rod systems, new structural forms of long-span membrane-rod structures, efficiency of new facilities

For citation: A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan. New types of membrane-rod and membrane-pneumatic structures and improved methods for their calculation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(1): 185-193. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-185-193

Введение. Впервые в нашей стране быстровозводимые сооружения из металлических конструкций появились благодаря инженеру Шухову В.Г. в Российской Империи в городе Нижнем Новгороде на Всероссийской промышленной и художественной выставке в 1896 году. За летние месяцы 1896 года были возведены три большепролетных сооружения, одна из них, ротонда диаметром 68 метров (рис. 1, 2).

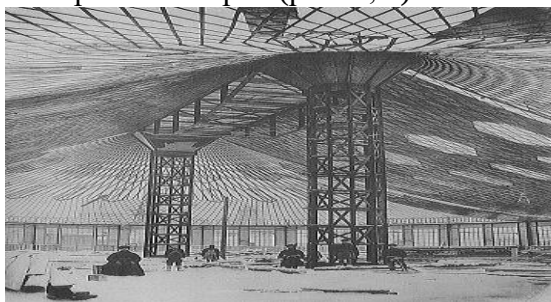


Рис. 1. Ротонда из металлических конструкций диаметром 68 метров
Fig. 1. Rotunda made of metal structures with a diameter of 68 meters

Для нашей страны это было впервые, когда такие сооружения из готовых деталей собрали на площадке за три месяца. Сейчас это бы назвали «отверточной сборкой», когда из конструкций заводского изготовления на строительной площадке собирают новое сооружение. Массовое строительство быстровозводимых сооружений из металлических конструкций началось в США в тридцатые годы двадцатого века. Первые такие сооружения были возведены в штате Аляска, а потом распространились и на другие штаты. И постепенно стали распространяться за пределы США в другие страны, в том числе и в СССР. В СССР первые быстровозводимые сооружения появились после начала Великой Отечественной Войны. В Иран в декабре 1941 года стали поступать товары по Ленд-лизу, для хранения которых понадобились сотни вместительных складов, поэтому рядом с портами на Каспийском море построили данные быстровозводимые сооружения.

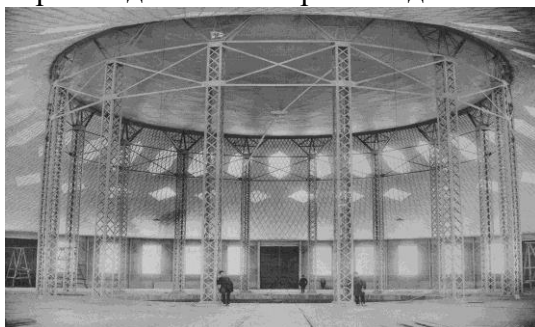


Рис. 2. Быстровозводимое сооружение Ротонды диаметром 68 метров
Fig. 2. Prefabricated structure Rotunda with a diameter of 68 meters

Для хранения бочек с ГСМ, грузовых автомобилей, авиационной техники, авиабомб американские строители возводили за пару недель из металлических конструкций ангары, которые собирали на строительной площадке из конструкций, которые привозили из США на кораблях (рис. 3). Начиная с 1943 года по 1945 годы в СССР было поставлено оборудование для пяти нефтеперерабатывающих заводов, в которое входило оборудование по возведению цехов из металлических конструкций. Данные конструкции привозились в СССР морским путем, а далее по железной дороге доставлялись до места возведения, и уже на месте советские строители собирали из данных конструкций цеха заводов. Такие нефтеперерабатывающие заводы были построены в Орске, Гурьеве, Куйбышеве и других городах СССР (рис. 4).



Рис. 3. Ангар из металлических конструкций для хранения самолетов (Иран)

Fig. 3. Hangar of metal structures for aircraft storage (Iran)

Так как у советских строителей не было опыта по возведению таких сооружений, да и объем работы был очень большой, поэтому и возводили такие сооружения около года, хотя в США нормативный срок строительства был в три раза ниже.

Следующим местом, где массово использовались быстровозводимые ангара из металлических конструкций, был маршрут Аляска-Сибирь (АЛСИБ). Через каждые две тысячи километров, там возводились аэродромы, на которых монтировались ангара из металлических конструкций. По данным отечественных исследователей, таких аэродромов было более десятка, и практически на всех них стояли быстровозводимые ангара из металлических конструкций, что создавало достаточно комфортную инфраструктуру авиабаз. [7, 8, 9]



Рис. 4. Цеха из металлических конструкций нефтеперерабатывающих заводов

Fig. 4. Shops from metal structures of oil refineries

В девяностые годы прошлого века в нашей стране стали появляться новые сложные большепролетные сооружения из металлических конструкций. Из наиболее значительных мембранно-стержневых сооружений отметим несколько, построенных в Адлере к Олимпиаде 2012 года в Сочи (рис. 5).



Рис. 5. Мембранно-стержневое покрытие стадиона Фишт в Сочи

Fig. 5. Membrane-rod coating of the Fisht stadium in Sochi

Постановка задачи. Целью данного исследования является создание новых быстровозводимых мембранно-стержневых сооружений и нелинейных методов их расчета. Учет нелинейных факторов позволяет сделать расчет более точным, тем самым уменьшить сечения элементов, из которых изготовлены конструкции сооружений и добиться значительной экономии, что существенно в условиях мирового экономического кризиса и санкций, введенных против нашей страны.

Авторами данной статьи было разработано и запатентовано новое мембранно-пневматическое сооружение, на которое получен патент РФ №2757438. Изобретение относится к наземному строительству, в частности к строительству большепролетных сооружений с мембранно-пневматическим покрытием и с пролетами от 60 до 150 метров (рис. 6,7). Мембранно-стержневые и мембранно-пневматические системы получили применение при строительстве облегченных покрытий сооружений больших пролетов, таких как складские помещения, прозрачные перекрытия теплиц и оранжерей, крытые бассейны,

теннисные корты, выставочные павильоны, крытые стоянки автотранспорта или летательных аппаратов, гаражи для строительной, сельскохозяйственной и военной техники. В мембранно-стержневых конструкциях усилия с верхней мембраны на нижнюю передаются с помощью стоек, а в мембранно-пневматических с помощью накачанного под давлением воздуха между гибких мембран, а по статической работе, данные сооружения очень похожи. Как показал опыт, применяемые в мире мембранно-стержневые и линзообразные мембранно-пневматические системы относятся к прогрессивным конструкциям. Это эффективные системы, дальнейшее совершенствование которых открывает большие возможности в строительстве легких сооружений больших пролетов.

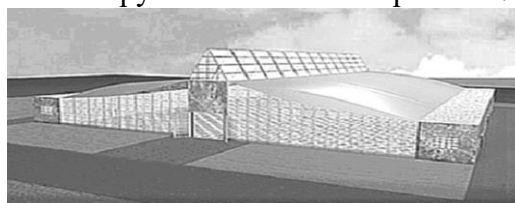


Рис. 6. Большепролетное мембранно-стержневое сооружение
Fig. 6. Long-span membrane-rod structure

При обычных нагрузках мягкая оболочка сооружения работает в воздухоопорном режиме. Но при падении избыточного давления воздуха во внутреннем помещении сооружения оболочку поддерживают арки, приваренные к фундаменту, представляющее собой замкнутую трубу большого диаметра. Избыточное давление воздуха под оболочкой падает, либо, когда прекращается подкачка воздуха под оболочку, либо во время открытия торца или дверей сооружения при въезде крупногабаритной техники. Несущая способность системы, достаточная для перекрытия небольшого и среднего пролета, может быть своевременно восстановлена и, если нужно, увеличена за счет повышения избыточного давления под оболочкой.

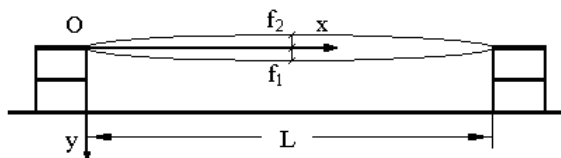


Рис. 7. Расчетная схема мембранно-стержневого сооружения
Fig. 7. Calculation scheme of the membrane-rod structure

Данное сооружение не нашло большого применения у нас в стране из-за высокой стоимости и больших эксплуатационных расходов. Так как в зимнее время требуется очень хорошее отопление, а в летнее время нужно охлаждение данного сооружения.

В последние десятилетия однопролетные линзообразные мембранно-пневматические системы широко применялись на военных базах США и с тех пор вызывают интерес у проектировщиков, специализирующихся на легких сооружениях больших пролетов. В таких сооружениях избыточное давление воздуха поддерживается только в замкнутых линзообразных полостях мембранно-пневматического покрытия, в то время как под покрытием, т.е. во внутреннем помещении сооружения, избыточное давление воздуха отсутствует. Необходимости в устройстве шлюзов в таком сооружении нет, что для МЧС и военных специалистов имеет большое значение. Технической задачей изобретения является уменьшение деформативности и повышение эксплуатационной надежности сооружения. Указанная задача достигается тем, что в сооружении 1 с мембранно-стержневым покрытием 2, прямоугольным в плане, содержащем расположенные над горизонтальным полом 3 внешнее опорное устройство 4, выполненное в виде боковых плоских стен 5 рамного типа, имеющих элементы оконного витража 6 и соединенных между собой торцевой стеной 7 сооружения, внутреннее опорное устройство 8, включающее один или два ряда вертикальных колонн 9, объединенных между собой многопролетным горизонтальным ригелем 10. Ригель, расположен вдоль сооружения, многопролетное предварительно напряженное мембранно-стержневое покрытие 2, состоящее из нескольких за-

мкнутых линзообразных полостей 11, образованных нижней 12 и верхней 13 мембранами, закрепленными при помощи анкерных устройств 14 к боковым плоским стенам внешнего опорного устройства 4 и расположенными над ригелем 10 каждого ряда вертикальных колонн 9 внутреннего опорного устройства 8. В данном сооружении нижняя 12 и верхняя 13 мембраны 2 покрытия соединены между собой по торцам каждой линзообразной полости 11 вертикальной пластиной 15, выполненной в виде набора плоских мембранно-стержневых панелей 16, а каждая мембрана 12, 13 выполнена в виде гибкой оболочки постоянной кривизны. Все эти позиции можно видеть на рис. 8-10.

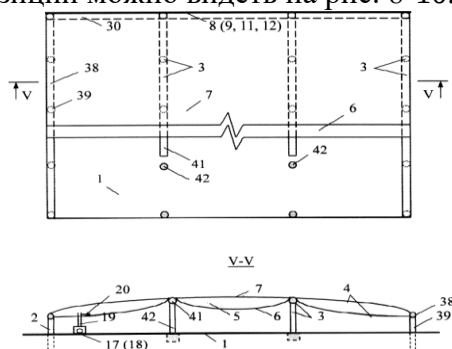


Рис. 8. План и разрез мембранно-стержневого сооружения I-I
Fig. 8. Plan and section of the membrane-rod structure I-I

Постоянство мембраны обусловлено равномерностью сил предварительного напряжения мембран избыточным давлением воздуха, для уменьшения деформативности здания, внешнее опорное устройство выполнено в виде двух боковых зданий, каждое из которых включает две плоские стены 17, верхнюю плиту покрытия 18 и плиты межэтажного перекрытия 19, при этом нижняя и верхняя мембраны покрытия над ригелем каждого ряда вертикальных колонн герметично скреплены между собой по всей длине ригеля 20, обеспечивая автономную герметичность и независимую работу при силовых нагрузках каждой линзообразной полости мембранно-пневматического покрытия 21, внутри сооружения стены боковых зданий на уровне верхнего этажа соединены между собой горизонтальными стержнями, объединенными с отдельными вертикальными колоннами внутреннего опорного устройства и расположенными поперек сооружения ниже мембранно-пневматического покрытия 22, внутреннее помещение сооружения, расположенное между покрытием и полом сооружения 23, имеет избыточное давление воздуха, поддерживаемое воздуходувательной машиной 24, согласно изобретению, внешнее опорное устройство выполнено в виде двух продольных боковых многоэтажных зданий, каждое из которых включает две плоские стены, верхнюю плиту покрытия и нижние плиты межэтажного перекрытия, нижняя и верхняя мембраны покрытия сооружения над ригелем каждого ряда вертикальных колонн герметично скреплены между собой по всей длине ригеля, обеспечивая автономную герметичность и независимую работу под силовыми нагрузками каждой линзообразной полости мембранно-пневматического покрытия, а внутри сооружения стены продольных боковых зданий на уровне верхнего этажа зданий соединены между собой несколькими горизонтальными стержнями, объединенными с отдельными вертикальными колоннами и расположенными поперек сооружения ниже мембранно-пневматического покрытия.

Из проектов сооружений следует, что стоимость линзообразных мембранно-стержневых покрытий сооружений больших пролетов, примерно равна стоимости анкерных конструкций, т.е. в данном случае стоимости продольных боковых многоэтажных зданий, а также их колонн, забитых своей нижней частью в грунт.

К примеру, в однопролетном сооружении при снеговой нагрузке, составляющей сто килограмм на один квадратный метр покрытия общей площадью в один гектар, суммарный распор покрытия составляет около десяти тонн на один погонный метр длины сооружения. Общий же поперечный распор при длине сооружения в сто метров составляет

тысячу тонн. Распоры в сооружении особенно большие при пролетах, равных 150 метрам. Мембранно-стержневое покрытие идеально работает на растяжение и является наиболее легкой и в то же время достаточно жесткой конструкцией даже при больших пролетах. А мощные анкерные конструкции - это цена за эту легкость покрытия и большую величину перекрываемых пролетов. Возможность перекрывать большие пролеты - неоспоримое это достоинство мембранно-пневматических систем. Но конструкция при этом должна быть достаточно жесткой и надежной в эксплуатационном отношении.

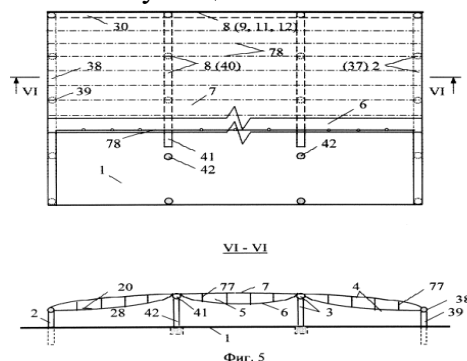


Рис. 9. План и разрез мембранно-стержневого сооружения II-II
Fig. 9. Plan and section of the membrane-rod structure II-II

Для военных специалистов важна живучесть конструкции, т.е. надежность конструкции при ее частичном разрушении. Такими конструкциями и являются данные сооружения. Им не страшны дыры от пуль, так как постоянная подкачка воздуха происходит всегда и в том количестве, в котором это необходимо.

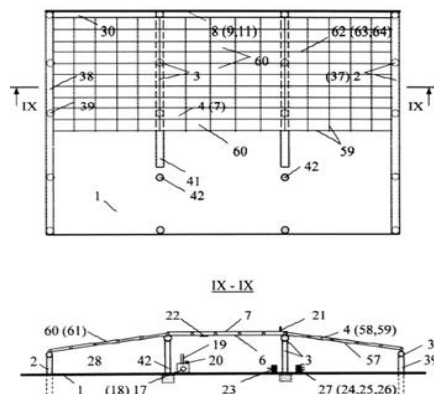


Рис.10. План и разрез мембранно-стержневого сооружения III-III
Fig.10. Plan and section of the membrane-rod structure III-III

Методы исследования. Для расчета таких сооружений авторами статьи разработана методика статического расчета мембранно-стержневых сооружений с учетом нелинейных факторов. Составлен алгоритм расчета и по нему написана программа расчета таких сооружений. На данную программу получено свидетельство на ЭВМ № 2017613415 «Программа расчета мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов итерационным методом приращения параметров», по которой и произведено численное исследование таких достаточно сложных сооружений.

Для расчета нами применен шаговый метод с итерационной численной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности с применением на шаге метода конечных элементов. Для данного расчета авторами статьи применен один шаг и достаточно большое количество итераций, но если возникнет такая необходимость, например, для решения задач динамики, то можно применять и многошаговый метод [1-4, 13]. Множество итераций нами было применено для определения величин геометрической и конструктивной нелинейности данного сооружения.

Обсуждение результатов. После проведенного численного исследования мембранно-стержневых сооружений различного пролета с помощью программных комплексов нами сделаны следующие выводы по конструктивным схемам сооружений такого вида.

Пролет 36 м - требуются продольные боковые многоэтажные здания с фундаментом на естественном основании.

Пролет 72 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде железобетонных свай заглублены в грунт на глубину в 15 метров.

Пролет 100 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде металлических свай заглублены в грунт на глубину в 15 метров и при этом концы свай снабжены винтами диаметром, равным два метра.

Пролет 120 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде металлических свай заглублены в грунт на глубину в 15 метров. При этом концы свай снабжены винтами диаметром в три метра. Винтовые сваи работают на выдергивание с большей силой. Используется высокая эффективность свайных ростверков при работе на изгиб и выдергивание.

Пролет 150 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде металлических свай заглублены в грунт на глубину, равную 15 метрам.

Концы свай снабжены винтами двухметрового диаметра, а стены продольных боковых многоэтажных зданий соединены горизонтальным стержнем, выполняющим роль распорки, препятствующей наклону боковых зданий вовнутрь сооружения под действием распора от растянутых мембран покрытия. Поперечный стержень целесообразно выполнять трубчатого поперечного сечения для повышения его устойчивости. Благодаря монолитному объединению поперечного горизонтального стержня с вертикальными колоннами внутреннего распорного устройства, устойчивость стержня определяется в многопролетном сооружении длиной только одного пролета.

При пролетах 120-150 метров повышение надежности работы сооружения достигается за счет возникающего при избыточном давлении воздуха во внутреннем помещении воздушного подпора, действующего на покрытие и стены боковых зданий сооружения. Воздушный подпор воспринимает значительную часть снеговой и ветровой нагрузки и уменьшает значительную часть распора, воспринимаемого анкерными конструкциями. Такая конструкция дает возможность пропускать в открытые ворота большегрузный транспорт. Если во время действия ураганов закрыть шлюзы и повысить избыточное давление во внутреннем помещении сооружения до расчетной величины, то, гарантируется сохранность сооружения при сильных ураганах (но не при тайфунах, когда требуются тяжелые здания). Другими словами, стены сооружения воспринимаются как распоры от мембран, так и давление ветра с внешней стороны сооружения. С внутренней же стороны сооружения действует избыточное давление воздуха в замкнутой полости внутреннего помещения сооружения. Это суммарное давление уравновешивает ветер, способствуя улучшению напряженно-деформированного состояния элементов внешних опорных конструкций в период эксплуатации сооружения. Избыточное давление воздуха, действующее изнутри сооружения по величине примерно того же порядка, что и наружное давление. После проведенного численного исследования установлены величины геометрической и физической нелинейности и несущая способность сооружений такого вида.

Вывод. После проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы. Такие конструкции предназначены быть большепролетными и ими можно перекрывать пролет сооружения от 36 до 150 метров. Если пролет превышает сто и более метров, то боковые здания, на которые крепится конструкция перекрытия, должны иметь металлические сваи, заглубленные в грунт на пятнадцать метров. Концы свай снабжены винтами диаметром в три метра. Винтовые сваи работают на выдергивание с большей силой. Используется высокая эффективность свайных ростверков при работе на изгиб и выдергивание. Про величину геометрической нелинейности в таких сооружениях можно сделать стандартный вывод, чем больше величина пролета и нагрузка, тем больше нелинейность.

Влияние геометрической нелинейности на прогибы мембранно-стержневых систем не превышает 3-5 %, а на усилия 12-15%.

Метод конечных элементов в сочетании с шаговыми методами в настоящее время является лучшим методом для расчета нелинейных сооружений [10, 11, 14 - 18]. Для исследований рекомендовано применять одношаговый расчёт мембранно-стержневых систем с пятью итерациями на шаге, либо многошаговый расчёт с пятью шагами при одной итерации на шаге. Эффективны также смешанные варианты.

Результаты расчета на прочность, жесткость и устойчивость линзообразных мембранно-стержневых систем покрытий пролетом 150 метров выполнены с учетом требований действующих строительных норм при подборе толщин несущей и напрягающей мембран линзы. При этом выполнена проверка покрытия на максимально допустимый прогиб системы для определения максимальной несущей способности покрытия. Район строительства – третья климатическая зона, расчетная и нормативная снеговая нагрузка 140 кг и 100 кг на один квадратный метр горизонтальной поверхности [5, 6, 12]. При пролете системы, равном 150 метров, толщины стальных мембран приняты равными 10 мм для несущей мембраны и 8 мм для напрягающей мембраны. Избыточное давление в линзе принято равным 5000 Па. Вес обеих мембран на один квадратный метр стального покрытия составляет 144 кг (80 кг и 64 кг), что экономически эффективно.

Библиографический список:

1. Городецкий, А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. / А.С. Городецкий и др. – М.: Транспорт, 1981.– 143 с.
2. Давиденко Д. Ф. О приложении метода вариации параметра к теории нелинейных функциональных уравнений. / Д.Ф. Давиденко // Укр. матем. журнал, 1955. т. 7. – Киев, с. 56–64.
3. Давиденко Д.Ф. О применении метода вариации параметра к построению итерационных формул повышенной точности для определения численных решений нелинейных интегральных уравнений. Докл. АН СССР, т. 162.– М., 1965, с. 78–85.
4. Игнатьев А.В. Основные формулировки метода конечных элементов в задачах строительной механики. Часть 3 // Вестник МГСУ 2015. № 1. С. 16–26.
5. Ким А.Ю. Расчет мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. Монография. Континуальные расчетные схемы / А.Ю.Ким. Саратов. гос. аграр. ун-т.- Саратов, 2000. - 198 с.- Деп. в ВИНТИ 24.04.00. - № 1148 - В2000.
6. Ким А.Ю. Многопролетные мембранно-стержневые покрытия сооружений/ А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. - 2003.- № 2. - С. 72-74.
7. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132>
8. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132>
9. Металлические конструкции, под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.-688 с.
10. Петров, В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. В.В. Петров – Саратов: Изд-во СГУ, 1975.– 118 с.
11. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра-Инженерия, 2014. – С. 480.
12. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».
13. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. / Г. Стренг, Д.М. Фикс: Мир, 1977. – 349 с.
14. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.-447 с.
15. Belostosky A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 153. – P. 83–88.
16. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – T 456.
17. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory // Pro-ceeding of the Royal Society. Ser. A. 2000. Vol. 456. No 8. Pp. 2223–2242.

References:

1. Gorodetsky, A.S. Finite element method in the design of transport facilities. A.S. Gorodetsky and others . M.: Transport, 1981; 143 [In Russ]
2. D. F. Davidenko. On the application of the parameter variation method to the theory of nonlinear functional equations. *Ukr. math. magazine*, 1955; 7: 56–64.
3. Davidenko D.F. On the application of the parameter variation method to the construction of iterative formulas of increased accuracy for determining the numerical solutions of nonlinear integral equations. *Report USSR Academy of Sciences*, M., 1965; 162.:78–85 [In Russ]
4. Ignatiev A.V. Basic formulations of the finite element method in problems of structural mechanics. Part 3. *Vestnik MGSU* 2015;1: 16-26. [In Russ]
5. Kim A.Yu. Calculation of membrane-pneumatic systems taking into account non-linear factors. Monograph. Continuum design schemes. *Sarat. state agrarian un-t.* - Saratov, 2000; 1148: 198 - Dep. at VINI-TI 24.04.00. - No. 1148 - B2000. [In Russ]
6. Kim A.Yu. Multi-span membrane-rod coatings of structures. *Vestnik SSAU*. 2003; 2: 72-74. [In Russ]
7. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Numerical study of the influence of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132> [In Russ]
8. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Numerical study of the influence of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132>[In Russ]
9. Metal structures, ed. Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008; 688. [In Russ]
10. Petrov V.V. Method of successive loadings in the nonlinear theory of plates and shells. *Saratov: Publishing House of SGU*, 1975;118[In Russ]
11. Petrov V.V. Nonlinear incremental structural mechanics. M.: *Infra-Engineering*, 2014; 480. [In Russ]
12. SP 20.13330.2016 "Loads and impacts"[In Russ]
13. Streng G., Fix D. Theory of finite element method. / G. Streng, D.M. Fix: Mir, 1977; 349.
14. Trofimov V.I., Ereemeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" Moscow, *Stroyizdat*, 1990; 447. [In Russ]
15. Belostosky, A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov. *Procedia Engineering*. 2016; 153: 83–88.
16. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modeling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456.
17. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory. *Proceeding of the Royal Society. Ser. A*. 2000; 456:(8): 2223–2242.

Сведения об авторах:

Ким Алексей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; sberbanksp@yandex.ru

Полников Сергей Валерьевич, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; Werad91@mail.ru orcid: 0000-0002-4670-309X

Миша Фрикович Амоян, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; ezid-007@ya.ru

Information about authors:

Aleksey Yu.Kim, Dr.Sci. (Eng), Prof., Department of Building Materials, Structures and Technologies; sberbanksp@yandex.ru

Sergey V. Polnikov, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; Werad91@mail.ru orcid: 0000-0002-4670-309X

Misha F. Amoyan, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; ezid-007@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 14.12.2022

Одобрена после рецензирования / Reviced 12.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.01.2023.